

PC 鋼材破断検知モニタリングの基礎的検討

福井大学	学生会員	○久世	右近
福井大学	正会員	鈴木	啓悟
(株) 日本ピーエス	正会員	角田	貴也
(株) 日本ピーエス	正会員	濱岡	弘二
(株) 日本ピーエス		天谷	公彦

1. はじめに

我が国の橋梁の建設数は高度経済成長期以降大きく増加し、それに伴い、プレストレストコンクリート(PC)橋梁数も増大してきた。近年これらのPC橋において老朽化などによるPC鋼材の破断や損傷が問題となっている。PC鋼線の破断を目視点検で把握することは困難であり、これまでは各種非破壊試験や削孔等による破壊的試験が実施されてきた。しかしこれらの手法ではリアルタイムでの破断を検知することは困難である。そこで本研究では、破断時に発生する弾性波を圧電センサーで有効に捕捉するための波形抽出法と適切なセンサー配置を検討する。

2. ラム波に関する検討

可聴音レベルで破断が生じる場合、発生する弾性波の波長は長く、PC桁のウェブをラム波として伝搬する傾向があり¹⁾、低減衰で長距離を伝搬する。そのためラム波の捕捉が破断検知モニタリングに有効であると考える。ラム波は板厚や材質、周波数により位相速度及び群速度が変化する速度分散性及び多数の伝搬モードが存在する多モード性を有する。この特性はRayleigh-Lamb周波数方程式で表現され、平板の縦波速度を c_L 、横波速度を c_T 、位相速度を c_p 、伝搬する波の周波数を ω とすると、対称モード(S)と非対称モード(A)のRayleigh-Lamb周波数方程式は式(1)・(2)となる。

$$\text{Sモード} \quad \frac{\tan(k_\alpha d/2)}{\tan(k_\beta d/2)} = -\frac{(k^2 - k_\beta^2)^2}{4k^2 k_\alpha k_\beta} \quad (1)$$

$$\text{Aモード} \quad \frac{\tan(k_\alpha d/2)}{\tan(k_\beta d/2)} = -\frac{4k^2 k_\alpha k_\beta}{(k^2 - k_\beta^2)^2} \quad (2)$$

$$\text{ここで} \quad c_p = \omega/k, k_\alpha = (\omega^2/c_L^2 - k^2)^{1/2}, k_\beta = (\omega^2/c_T^2 - k^2)^{1/2}$$

また群速度 c_g は式(3)から求められる。

$$\text{群速度式} \quad c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c_p^2}{c_p - fd \cdot \frac{dc_p}{d(fd)}} \quad (3)$$

ここで、 d (m): 板厚とする。

図1に板厚80mmのコンクリート平板に関する速度分散曲線を示す。破断時に生じる波の周波数成分は主

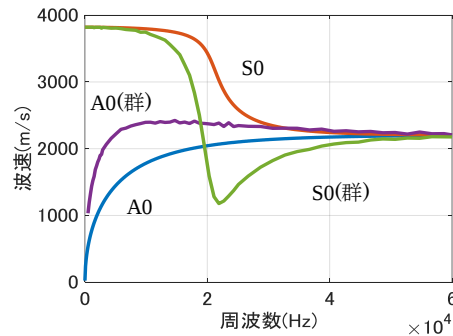


図1 速度分散曲線 (コンクリート・板厚80mm)

に5kHz以下である¹⁾。本研究では、A0モードを抽出し、波断位置の特定に利用する。A0モードはSモードに比べ、波が減衰しにくく、波の振幅も大きいため離れた点でも捕捉できる可能性があり、大規模構造物モニタリングに適すると考えられる。しかし速度分散曲線より、5kHz以下ではA0モードの波速は安定しない。そこで特定の速度帯のみを抽出し、群速度で評価することで、A0モードにおいても比較的安定した波速を得ることが可能であると考えた。

3. PC破断模擬実験

本研究で用いた試験体の概要を図2に示す。全長が9940mm、支間長8500mm、I型プレテンションPC桁を用いた。実験方法はハンマーによる打撃を行い、センサーの配置・間隔を変えた3パターンで計測を行う。サンプリングレートは100kHzとし、打撃時に発生する弾性波を取得する。各配置パターンを図3, 4, 5に示す。パターン①は、センサーをウェブを挟み込むように配置し、ラム波の発生を確認する。パターン②は図4のように桁中央部に200mmの等間隔で配置し、波速の計測を行う。パターン①, ②では桁左端の側面を打撃する。パターン③は、中心から2.3m, 1.1m離れた位置に200mm間隔で4ずつ配置する。図の赤丸で示してある位置で側面を打撃し、その位置の特定を試みる。実験の様子を図6に示す。

4. 単一モードの抽出と波速の算出

実験のパターン①から得られた生波形を図7に示す。逆位相で波が伝搬しており、ラム波の発生、A0モードが支配的であることが確認された。パターン

キーワード プレストレストコンクリート PC鋼線破断 弾性波モニタリング ラム波 非対称モード
連絡先 福井大学 〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1 TEL:0776-27-8596

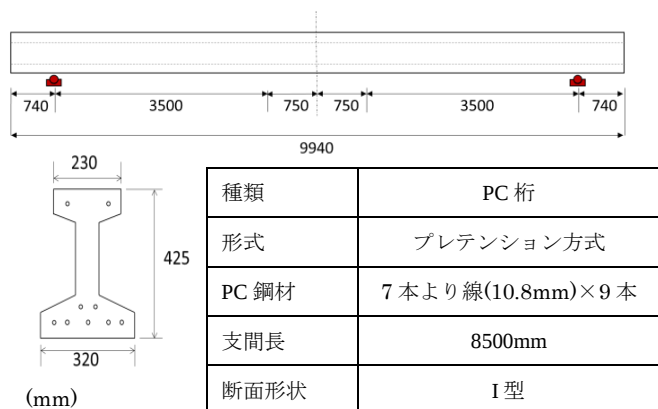


図 2 試験体概要

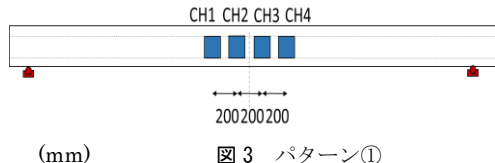


図 3 パターン①

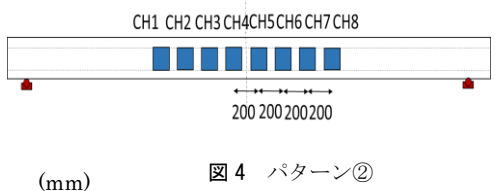


図 4 パターン②

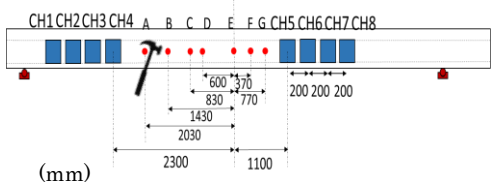


図 5 パターン③



図 6 実験の様子

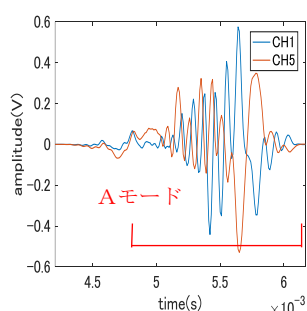


図 7 生波形

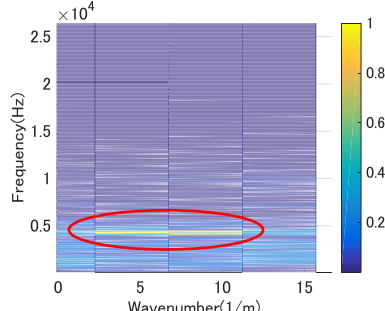


図 8 2DFFT 後の k-f 分布

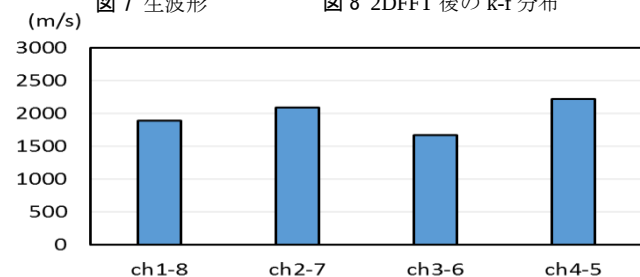


図 9 センサー距離ごとに算出した波速

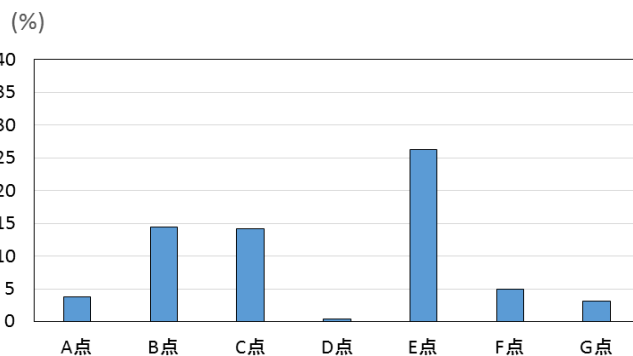


図 10 算出波源位置の真値との誤差率

②で得られた波形群に対して二次元フーリエ変換した結果を図 8 に示す。図より発生する弾性波の周波数帯は 5kHz 以下であった。さらに 3kHz~4kHz の周波数帯域が主であることが確認され、これは理論値から算出した分散曲線上の A0 モードの波数一周波数に概ね一致している。また相互相関関数により時間差、波速をセンサー間隔が異なる組み合わせで算出を行った。その結果を図 9 に示す。得られた波速は凡そ 2000m/s で安定しており、これは図 1 で示した速度分散曲線の A0 モードの 3kHz~4kHz の周波数帯域に対応する速度と概ね一致している。パターン③は相互相関関数で得られた時間差、理論値の群速度である 2000m/s から波源位置を算出する。

5. 結果

パターン③で得られた結果をセンサー同士の時間差をセンサー間隔が等しい組み合わせで平均化し、波源位置の算出を行った。打撃点ごとに得られた値を真値を基準に比較し、誤差率を算出した。その結果を図 10 に示す。E 点のみ誤差率が 20%を超える結果となったが、他の打撃点では誤差率が 20%以内と実際の波源位置と概ね一致した。

6. 結論

以下に本研究で得た知見をまとめる。

- (1) 波源位置推定はつぎの 4 プロセスで可能であることが示唆された。1)速度分散曲線を板厚に応じて求めておく。2)圧電センサーで多点計測を行い、得られたデータ群に二次元フーリエ変換を施す。3)支配的なモードと周波数帯を把握する。4)それらに対応する理論値速度と相互相関関数により求める時間差から凡その波源位置の把握する。
- (2) 本研究の対象桁では、100kHz のサンプリングレートで取得可能であり、4 センサーを 200mm の等間隔で配置し、A0 モードに着目することで凡その波源位置の特定が可能であった。

参考文献

- 1) Influence of Tendon Breaks on Structural Behavior of Concrete Beams: H. Kaneko, et al., Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges, pp,1074-1081, 2018.